

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДЯНЫХ
ЗАВЕС НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

М.А. Дмитриенко

Научный руководитель профессор П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Водяная завеса является важной составляющей систем автоматического пенного пожаротушения и защиты близлежащего технологического оборудования от воздействия теплового потока. Выполненные экспериментальные и теоретические исследования показывают возможность существенного повышения эффективности тушения пожаров с использованием распыленной воды [1].

Главной проблемой применения пароводяной завесы является нарушение ее целостности под влиянием двух основных факторов:

- столкновения капель в процессе их падения;
- испарения капель под воздействием теплового излучения.

Цель данной работы заключается в анализе процесса коагуляции (слияния) капель воды в процессе их столкновения при движении в высокотемпературной газовой среде.

Исследования проводились с использованием экспериментальной установки, представленной на рисунке 1. Основными элементами установки являются: кросскорреляционная видеокамера (формат изображения – 2048x2048 пикселей, кадровая частота – 1.5 Гц, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами – 5 мкс), высокоскоростная видеокамера.

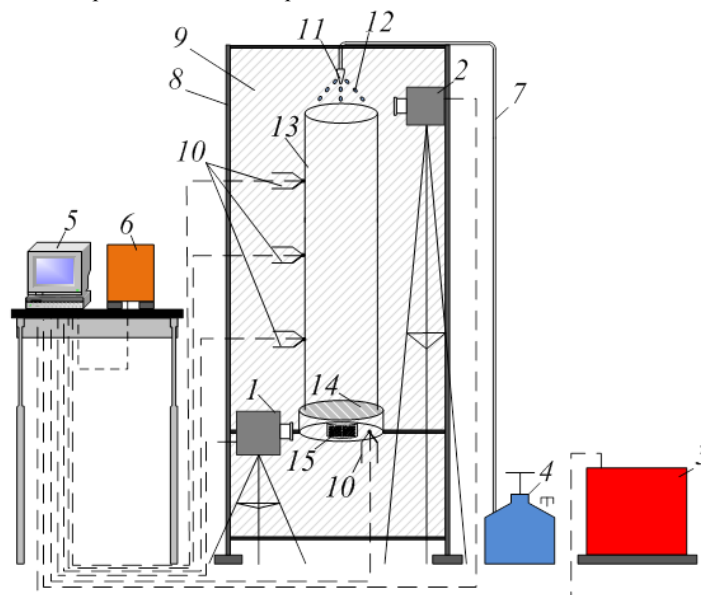


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – кросскорреляционная камера; 3 – нагревательная установка;
4 – емкость с водой; 5 – ПК; 6 – аналитические весы; 7 – канал подачи воды; 8 – штатив;
9 – стеклянные стенки камеры; 10 – термодатчики; 11 – механическая форсунка (распылитель или дозатор); 12 – капли (или их поток) воды; 13 – полый цилиндрический канал; 14 – подложка;
15 – очаг возгорания

Цикл опытов включал две серии по десять экспериментов в каждой. Каждая серия эксперимента предусматривала несколько этапов.

Вода заливалась в емкость 4, в которой устанавливалась хромель-копелевая термопара для контроля ее начальной температуры. Серии экспериментов проводились за короткие интервалы времени с целью минимизации расхождений условий проведения опытов, а также обеспечения постоянства состава рабочей жидкости и продуктов сгорания. К выходу емкости подключался дозатор 11, который настраивался в зависимости от необходимых параметров распыления жидкости. Начальная температура вводимых в газовую среду капель воды поддерживалась около 300 К с использованием нагревательной установки 3.

Для формирования потока высокотемпературных газов в экспериментальном стенде использовался цилиндрический канал 13 (высота 1 м, диаметр 0.3 м). В основании канала 13 устанавливался полый цилиндр 14 (высота 0.1 м, внутренний и внешний диаметры – 0.26 м и 0.3 м соответственно), в котором располагался очаг возгорания 15. Температура газов (продуктов сгорания) в экспериментах составляла от 500 К до 1200 К. Измерения проводились тремя хромель-алюмелевыми термопарами (диапазон измеряемых температур –273–

1373 К, погрешность измерения $\pm 3,3$ К).

Перед проведением опытов с каплями воды в газовую среду вводили «трассеры» – частицы диоксида титана. Скорости «трассеров» поддерживались около 1,5 м/с. Для измерения U_g использовался панорамный оптический метод PIV [2]. Далее на ПК запускалось специальное программное обеспечение «Actual Flow», включался дозатор и проводилась процедура регистрации видеogramм в выбранной рабочей области. Размеры каждого видеокдра в области высокотемпературных газов выбирались в соответствии с характерной длиной регистрируемых траекторий движения исследуемых сталкивающихся капель.

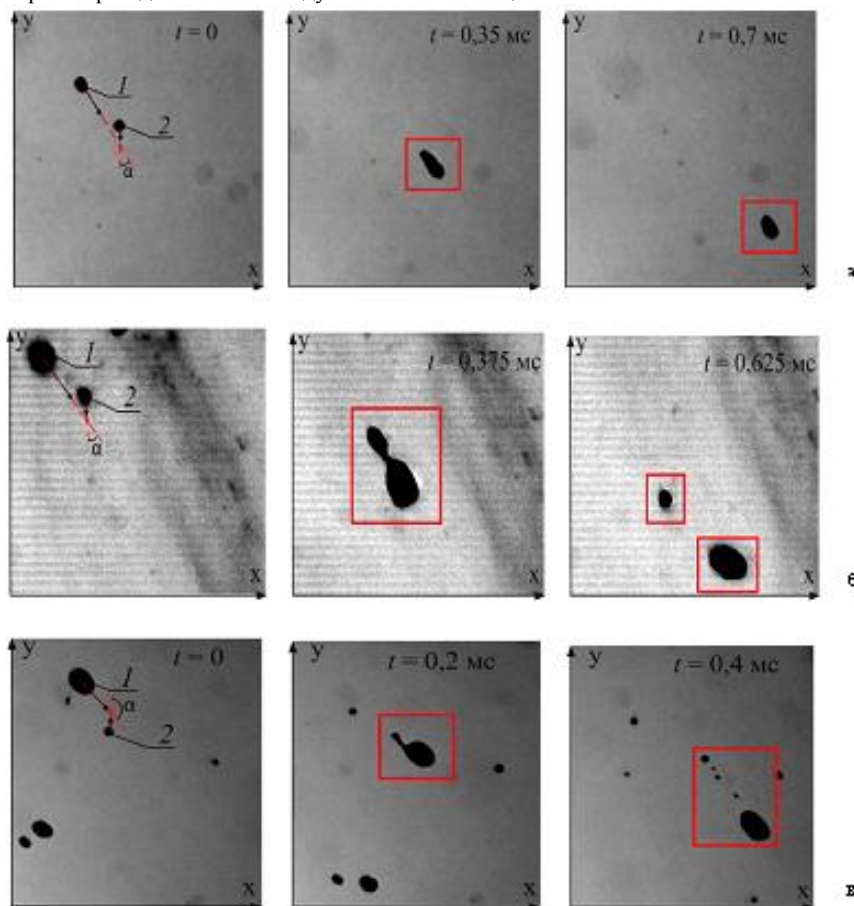


Рис. 2. Видеogramмы эксперимента с реализацией первого (а), второго (б), третьего (в) режимов столкновения капель

Исследования проводились для капель полидисперсного водяного потока. Начальные размеры (радиусы) капель варьировались в диапазоне $0,05 \leq R_m \leq 0,5$ мм. Размеры R_m и скорости перемещения U_m капель измерялись с использованием панорамных оптических методов PIV и IPI [3]. Относительная объемная концентрация капель (в соответствии с ограничениями методов PIV и IPI) поддерживалась в диапазоне $0,001 - 0,0012$ м³ каплей жидкости / м³ газа. Систематические погрешности определения размеров R_m и скоростей U_g и U_m с применением панорамных оптических методов PIV и IPI не превышали 1,6 % и 2,1 %. Максимальные случайные погрешности определения рассматриваемых параметров составили: $R_m - 2,1$ %, U_g и $U_m - 3,4$ %.

Также при обработке видеogramм экспериментов определялись углы пересечения траекторий движения капель в момент их столкновения α_m с использованием специализированного программного обеспечения и параметрической сетки.

В ходе проведения эксперимента были выделены три режима столкновения капель. При первом режиме (P1) столкновения двух капель происходит их коагуляция и дальнейшее движение объединенной капли (рисунок 2а). При втором режиме (P2) столкновения двух капель происходит их слияние и дальнейший распад капель на идентичные, по размерам, начальным каплям (рисунок 2б). При третьем режиме (P3) столкновения двух капель происходит их слияние и дальнейшее дробление на несколько более мелких капель (рисунок 2в).

При анализе полученных результатов определен вероятностный характер реализации установленных режимов. Вероятность возникновения одного из трех режимов рассчитывалась в зависимости от размеров, скоростей движения, углов пересечения траекторий перемещения капель. Далее приведены типичные диаграммы с вероятностями реализации трех режимов столкновений (P_1 , P_2 , P_3).

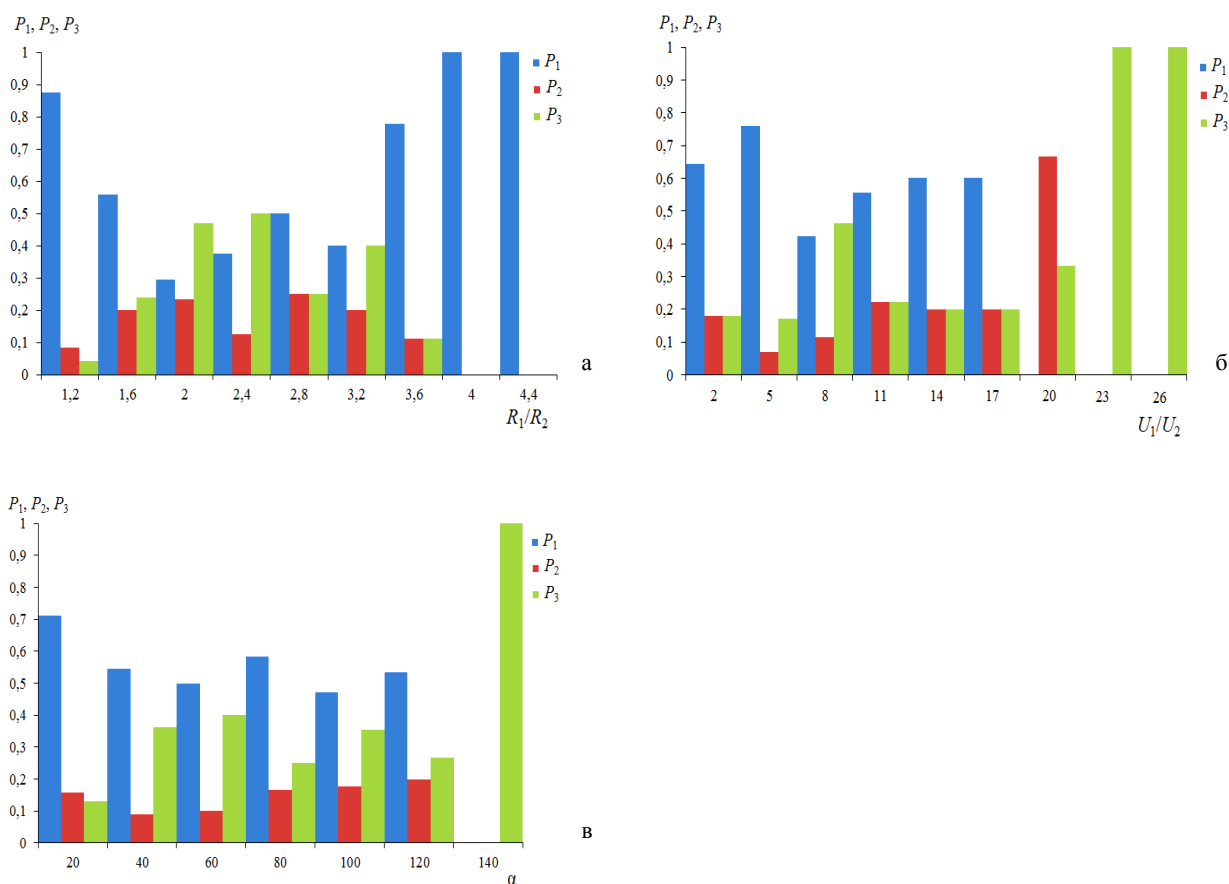


Рис. 3. Вероятности реализации трех режимов столкновений в зависимости от: отношения начальных размеров капель (а), отношения начальных скоростей капель (б), угла столкновения капель воды (в)

Проведенные экспериментальные исследования процессов столкновения и дробления капель при их движении в высокотемпературной газовой среде позволяют проанализировать влияние на выделенные режимы столкновений капель их размеров, скоростей движения, углов пересечения траекторий перемещения капель.

При анализе полученных гистограмм установлено, что для поддержания целостности водяной завесы предпочтительными являются: отношение начальных размеров капель $2 < R_1/R_2 < 3,6$; отношение начальных скоростей капель $8 < U_1/U_2 < 20$; угол столкновения капель воды $60^\circ < \alpha < 120^\circ$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-00057 А.

Литература

1. Дмитриенко М. А., Жданова А. О., Забелин М. В., Стрижак П. А. Исследование процессов смешения парок капельных и высокотемпературных газовых смесей // Современные проблемы науки и образования, 2014. – №. 3. – С. 1- 8.
2. «Particle image Velocimetry. Руководство пользователя программы «ActualFlow». Версия 1.17.3: Институт теплофизики ми С.С. Кутателадзе СО РАН. - Новосибирск, 2012.
3. «Интерферометрический метод измерения диаметров частиц (IPI). Руководство пользователя»: Институт теплофизики ми С.С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск, 2013.